

文章编号:1673-2049(2010)03-0047-06

基于可靠度理论的悬索桥主缆线形 控制参数研究

严小宇¹, 沈锐利¹, 唐茂林¹, 陈卫国²

(1. 西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 浙江省舟山连岛
工程建设指挥部, 浙江 舟山 316000)

摘要:提出基于自适应重要抽样的可靠度分析方法,并给出具体实现步骤;以角笼坝大桥、海沧大桥、坝陵河大桥、西堠门大桥 4 座不同跨度的悬索桥为背景,根据理论计算与实际的试验数据得到了悬索桥跨度、高差、垂度、钢丝直径、弹性模量、温度的分布情况,然后用该方法对它们的基准索股可靠度与空缆线形可靠度进行分析计算,并讨论了参数的敏感性。结果表明:在现有的测量精度下,随着跨度的增大,基准索股施工线形达到设计线形的可靠度指标减小;随着主缆索股根数的增加,空缆线形可靠度指标减小;对于基准索股线形,弹性模量是最主要的影响因素;对于空缆线形,温度是最主要的影响因素。

关键词:悬索桥;主缆线形;可靠度;蒙特卡洛法

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A

Research on Control Parameter of Main Cable Shape of Suspension Bridge Based on Reliability Theory

YAN Xiao-yu¹, SHEN Rui-li¹, TANG Mao-lin¹, CHEN Wei-guo²

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project,
Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

Abstract: The reliability analysis method on the basis of adaptive importance sampling was proposed and the concrete steps of this method were presented. Four suspension bridges including Jiaolongba Bridge, Haicang Bridge, Balinghe Bridge and Xihoumen Bridge, which differed from each other in span, were taken as examples. According to theoretical calculations and actual experimental data, the distributions of span, height difference, sag, steel wire-diameter, elastic modulus and temperature were obtained. Then the mentioned analysis method was used to calculate and analyze the reliability of datum strand and unloaded cable shape, as well as to discuss the parametric sensitivity. The study result shows that, under the current measurement accuracy, the reliability index of construction geometry of datum strand meeting the design geometry decreases as span increases; the reliability index of unloaded cable shape decreases as main cable strand increases. For the datum strand shape, elastic modulus is the most important factor while temperature has the greatest influence on the unloaded cable shape.

收稿日期:2010-06-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAG07B05)

作者简介:严小宇(1984-),男,湖北宜昌人,工学硕士,E-mail:dokkdb@163.com。

Key words: suspension bridge; main cable shape; reliability; Monte Carlo method

0 引言

在悬索桥的设计施工中,主缆线形的确定是很重要的一个环节,成桥主缆实际线形的确定是悬索桥后继施工的基础,其线形的精确性将直接影响到施工各阶段线形的确定,以及关系到最终合理成桥线形的实现^[1]。大跨径悬索桥的主缆一旦形成,施工过程中不可能靠施工阶段的跟踪调整来实现设计的主缆线形,即无法对主缆线形进行调整^[2]。因此,必须在架设主缆的过程中,尽可能地保证主缆线形的精确性,同时,对其误差也应有一个控制和评定标准。

在实际的施工过程中,影响悬索桥主缆线形的因素很多,如索股高强钢丝的直径、弹性模量、温度、跨度等。这些因素的不确定性会对主缆线形产生较大的影响,但是现有的主缆线形计算理论和计算软件却没有考虑这些因素变异性的影响。要考虑这些因素变异性的影响,需要应用结构可靠度理论。已有的可靠度理论主要是研究主缆强度的控制标准^[3-4],对于实现主缆线形控制指标的可靠性还未见文献报道。

本文中采用可靠度理论研究钢丝直径、弹性模量、温度、跨度、高差、垂度这些因素的变异性对主缆线形的影响,分析这些因素对主缆线形影响的程度与趋势,根据分析结果,提出对应的建议与方法。

1 基准索股与空缆线形的施工控制

1.1 基准索股线形

现代大跨度悬索桥的主缆一般由钢丝集束而成,相对抗弯刚度很小,基本上可作为完全柔性索处理。为了建立悬索桥主缆线形的计算方法,通常作如下 3 个基本假设^[5-6]:①索是理想柔性的,既不能受压也不能受弯;②用于悬索桥的高强平行钢丝索在正常受力情况下,应力与应变符合线性关系;③悬索桥主缆的截面面积及自重在外荷载作用下的变化量十分微小,可以忽略这种变化的影响。目前,悬索桥基准索股线形计算理论已经较为成熟,一般都是运用悬链线理论进行计算。

图 1 为承受 x, y 两个方向任意均布荷载 q_x, q_y 的 1 根悬索,其中 H 为索段张力的水平分量。根据第 1 条假定,索的张力 T 只能沿索的切线方向作用。由微分单元的静力平衡条件得

$$\sum X = 0, \frac{dH}{dx} dx + q_x dx = 0 \quad (1)$$

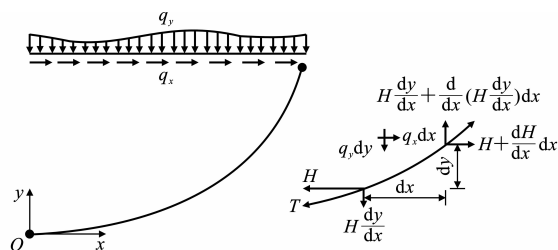


图 1 索段微分单元

Fig. 1 Differential Unit of Cable Segment

$$\sum Y = 0, \frac{d}{dx} \left(H \frac{dy}{dx} \right) dx - q_y dx = 0 \quad (2)$$

式中: X, Y 分别为 x, y 方向的合力。

式(1)、(2)为索的基本平衡方程。在悬索桥的主缆线形计算中,一般索段的水平分力荷载 $q_x = 0$, 则根据式(1)可知索段张力的水平分量 H 为常量, 因而式(2)可改写为

$$H \frac{d^2 y}{dx^2} - q_y = 0 \quad (3)$$

对于悬索桥主缆基准索股线形,基准索股受沿索曲线分布的自重荷载,其线形为悬链线,主缆自重荷载为 q ,跨中垂度为 f ,主缆两端支点跨度为 L ,高差为 C ,索段张力的垂直分量为 V ,主缆弹性模量和横截面积分别为 E, A 。按照图 2 所示坐标体系,悬链线的方程可写为

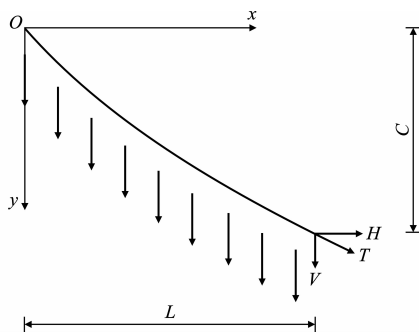


图 2 悬链线计算

Fig. 2 Catenary Calculation

$$y = \frac{H}{q} [\cosh \alpha - \cosh(\frac{qx}{H} - \alpha)] \quad (4)$$

式中: $\alpha = \operatorname{arsinh} \frac{\beta C/L}{\sinh \beta} + \beta, \beta = \frac{qL}{2H}$ 。

当 $x = \frac{L}{2}$ 时, $y = f$, 则

$$f = \frac{H}{q} (\cosh \alpha - 1) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,当其他条件一定时,对每一跨中垂度 f 值,均可由式(5)迭代求出一相应的 H

值,也就是说, f 与 H 是一一对应的关系。当求得 H 的值后,可求出有应力总长度 S 、弹性伸长量 ΔS 、无应力长度 S_0 ,即

$$S = \int_0^s ds = \int_0^L [1 + (y')^2]^{\frac{1}{2}} dx = \frac{H}{q} [\sinh(\frac{qL}{H} - \alpha) + \sinh \alpha] \quad (6)$$

$$\Delta S = \int_0^s \frac{T}{EA} ds = \int_0^L \frac{T}{EA} [1 + (y')^2]^{\frac{1}{2}} dx = \frac{H}{EAq} [\frac{1}{2} qL + \frac{1}{8} H (e^{-2\alpha+4\beta} - e^{2\alpha-4\beta} - e^{-2\alpha} + e^{2\alpha})] \quad (7)$$

$$S_0 = S - \Delta S \quad (8)$$

从式(4)~(8)中可以看出,在实际施工中,当两桥塔修建完毕(即公式中的 L 、 C 不变),跨中垂度确定以后,基准索股线形就确定了。考虑到主缆自身的物理特性,如钢丝直径、弹性模量等因素的影响,用基准索股的无应力索长作为控制标准。

另外,温度也是影响基准索线形的一个因素,也要加以考虑。理论计算中,温度的计算是以无应力索长不变作为理论基础的,因此在求得无应力索长的公式后,温度的影响也易于计算。

综合上面分析可知,对主缆线形有影响的因素有跨度、高差、垂度、钢丝直径、弹性模量和温度。

1.2 空缆线形

在基准索股和一般索股架设完成后,要进行整形、缠丝、涂装等一系列的工序,用来将各分散的索股形成一根完整的主缆。这一过程可理论性地看作是各索股在无应力长度恒定的情况下,通过自重荷载集度和垂度的互相协调来实现线形的最终统一,具体的分析过程见文献[7]。

按照现有计算理论的精度,实际的空缆线形与理论值应当有很高的吻合度,但实际上,许多悬索桥的空缆线形与理论设计值有较大出入。施工实践表明,主缆基准索股架设的精度是相当高的,所以造成空缆线形可靠度偏低的原因应当是在以基准索股为参照架设一般索股的过程中造成的,影响最大的因素是线形测量误差与温度测量误差,因此在空缆线形阶段取垂度测量误差与温度误差作为影响因素进行分析计算。

2 结构可靠度计算方法

2.1 可靠度计算方法综述

目前,计算结构可靠度常用的方法有一次二阶

矩法、二次二阶矩法、蒙特卡洛法、随机有限元方法等^[8]。这些方法中一次二阶矩法、二次二阶矩法对极限状态方程的解析表达式有一定的依赖性,相当多的大型结构可靠度问题是没有显式的极限状态方程直接表达的,应用这些方法来求解比较困难。随机有限元方法由于不能直接使用这些有限元程序,导致编程困难,通用性较差。

蒙特卡洛法提供了另一种求解结构可靠度问题的方法。它不需要显式的失效方程,省却了繁杂的数学推导和演算过程;它不需要考虑极限状态曲面的复杂性,收敛的速度与问题的维数无关,因此在结构可靠度问题的求解中得到了广泛的应用。

2.2 自适应重要抽样方法

当结构的失效概率较小时,直接应用蒙特卡洛方法会遇到抽样的困难。于是人们提出了许多降低方差的方法,如重要抽样、相关抽样、分层抽样等^[9],其中被认为最有效的是重要抽样方法。自1983年Shinozuka^[10]将重要抽样方法用于结构可靠度分析以来,已对它进行了许多研究和改进^[11]。

结合已有的研究成果^[12]及研究问题的实际情况,本文中采用改进的自适应重要抽样方法进行计算,若计算函数为 $f_x(x)=0$,失效域为 D' ,具体实施步骤如下:

(1)选取初始验算点 X ,这里 X 取为变量自身的均值点,方差为变量自身的方差。

(2)根据以上均值、方差进行抽样,得一抽样点,判断此点是否落在 D' 域内。

(3)对落入 D' 域内的点,计算 $f_x(x)$ 的值,找出当前 $f_x(x)$ 的最大值 f_1 ,并将相应的抽样点记为 X_1 ;对未落入 D' 域内的点,计算 $f_x(x)$ 的值,找出当前 $f_x(x)$ 的最小值 f_2 ,并将相应的抽样点记为 X_2 。

(4)重复步骤(2)、(3) N_1 次后,比较 f_1 与 f_2 值,若 $|f_1| < |f_2|$,则 $X = X_1$;若 $|f_1| > |f_2|$,则 $X = X_2$,回到步骤(2)。

(5)重复步骤(2)~(4) N_2 次后,得到新的设计点 X^* 。

(6)按照与步骤(2)~(5)相同的方法进行紧缩抽样,紧缩抽样的区间为 $(x-0.5\sigma, x+0.5\sigma)$,其中 x 、 σ 为各变量的均值和标准差。在进行紧缩抽样时,不再按照原函数进行抽样,而是以均匀抽样方式进行抽样。完成紧缩抽样后,得到更新后的设计点 X^{**} 。

(7)以 X^{**} 为设计验算点进行重要抽样,计算失效概率和与之相应的可靠度指标。

3 悬索桥主缆线形的可靠度分析

3.1 基本资料

为了分析不同跨度下各影响因素对主缆线形可靠度的影响,选取角笼坝大桥、海沧大桥、坝陵河大桥及西堠门大桥 4 座不同跨度的悬索桥进行主缆线形可靠度的计算。取悬索桥跨度 L 、高差 C 、钢丝直径 D 、弹性模量 E 、跨中垂度 f 、温度 t 作为变量进行分析。

当 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 时, X 落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 上的概率为 99.74%, 几乎是必然的, 而 X 落在该区间外的概率为 0.26%, 几乎是不可能的。正因为如此, 工程技术中常把 X 落在区间 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 外的情况忽略不计, 这就是数据处理中常用的 3σ 准则, 其中 μ 为均值。

表 1 跨度、垂度、高差分布

Tab. 1 Distributions of Span, Sag and Height Difference

大桥名称	位置	跨度		垂度		高差	
		均值/m	标准差/mm	均值/m	标准差/mm	均值/m	标准差/mm
角笼坝大桥	中跨	345.000	0.705 2	32.186	0.466 3	0.000	0.531 6
	边跨	61.500	0.667 9	13.194	0.479 1	24.600	0.650 4
海沧大桥	中跨	649.038	0.794 8	56.727	1.026 5	0.000	1.037 0
	边跨	229.557	0.684 0	46.135	1.032 8	77.466	0.835 7
坝陵河大桥	中跨	1 090.023	0.986 2	95.993	2.206 3	-6.528	1.824 5
	左边跨	247.003	0.686 7	70.442	2.213 4	131.536	1.349 7
	右边跨	227.115	0.683 6	64.212	2.218 0	120.570	1.396 3
西堠门大桥	中跨	1 653.234	1.288 1	151.446	4.509 2	0.147	3.271 6
	左边跨	576.809	0.769 6	117.495	4.503 3	194.922	2.375 7
	右边跨	482.957	0.740 3	108.060	4.504 9	191.077	2.358 8

表 2 钢丝直径分布

Tab. 2 Distributions of Steel Wire-diameter mm

大桥名称	直径	
	均值	标准差
角笼坝大桥	5.100 0	0.025 1
海沧大桥	5.100 0	0.025 1
坝陵河大桥	5.200 0	0.025 6
西堠门大桥	5.241 6	0.025 8

3.2 基准索股可靠度

为了考虑主缆钢丝的直径、面积、自重荷载等变量对主缆线形可靠度的影响,以基准索股无应力长度为标准建立极限状态方程,按照上述自适应重要抽样法原理及悬链线理论进行计算。

表 3 为西堠门大桥中跨的架设精度分别取不同值(边跨取与之对应 2 倍值)时的可靠度指标。从表 3 可以看出,中跨可靠度指标比边跨大,随着架设精

因此,本文中对悬索桥跨度 L 、高差 C 、跨中垂度 f 、温度 t 采用理论方法分析实际测量中各变量的误差,并结合 3σ 准则来确定,如角笼坝大桥中跨跨度这一变量由全站仪参数及误差计算公式计算,得到极限相对误差为 $m_s=2.115\ 7\ \text{mm}$,所以理论上认为其标准差 $\sigma \approx \frac{m_s}{3}=0.705\ 2\ \text{mm}$ 。悬索桥高差、跨中垂度、温度分布情况按此方法进行分析得到。

通过对西堠门大桥 454 根主缆钢丝进行试验,得到了 454 组直径与弹性模量的实测数据,对这些数据通过 Excel 进行统计分析,可以得到其分布情况。其中钢丝弹性模量和温度各桥都相同,弹性模量均值为 197.833 9 GPa,标准差为 2.864 7 GPa;温度均值为 0℃,标准值为 0.166 7℃。其他变量的分布见表 1、2。

表 3 西堠门大桥基准索股可靠度指标

Tab. 3 Reliability Indexes of Datum Strand of

Xihoumen Bridge			
相对控制精度	中跨	北边跨	南边跨
$L/5\ 000$	6.415	5.168	3.887
$L/7\ 500$	4.430	3.239	2.547
$L/10\ 000$	3.235	2.342	1.763
$L/15\ 000$	2.052	1.371	0.952
$L/20\ 000$	1.430	0.848	0.517
$L/30\ 000$	0.706	0.275	0.016
$L/40\ 000$	0.313	-0.052	-0.269
$L/50\ 000$	0.054	-0.271	-0.463

度要求的提高,可靠度指标随之减小。

表 4 为 4 座桥的中跨可靠度对比。由表 4 可以看出,可靠度指标随跨中架设精度的提高而减小,且趋势明显,曲线光滑。随着跨度的增大,以同样相对误差来控制架设精度,其可靠度指标将减小,即当跨

表 4 4 座桥的中跨可靠度指标

相对控制精度	角笼坝大桥	海沧大桥	坝陵河大桥	西堠门大桥
$L/5\ 000$	20.592	13.420	9.270	6.415
$L/7\ 500$	14.435	9.245	6.430	4.430
$L/10\ 000$	11.270	6.889	4.937	3.235
$L/15\ 000$	7.550	5.009	3.232	2.052
$L/20\ 000$	6.111	3.561	2.331	1.430
$L/30\ 000$	3.761	2.345	1.367	0.706
$L/40\ 000$	2.692	1.543	0.856	0.313
$L/50\ 000$	2.083	1.112	0.512	0.054

度增大时,各变量的误差相应地增大,造成了可靠度的降低。

3.3 基准索股线形的参数敏感性

为进一步分析各随机变量对结构可靠度的影响程度及趋势,分别改变各随机变量的变异系数,依次取为原变异系数的 0.5 倍、0.75 倍、2.0 倍、3.0 倍,分别求出不同变异系数下的可靠度指标。

经对 4 座桥的敏感性进行分析,得到了结论有一致性的规律和趋势,下面仅给出西堠门大桥中跨 $L/20\ 000$ 的参数敏感性,如表 5 所示。

表 5 西堠门大桥中跨 $L/20\ 000$ 的参数敏感性
Tab. 5 Parametric Sensitivities of Middle Span $L/20\ 000$ of Xihoumen Bridge

变异系数倍数	弹性模量	钢筋直径	垂度	跨度	高差	温度
0.50	3.076	1.427	1.449	1.431	1.435	1.428
0.75	2.050	1.424	1.435	1.425	1.428	1.424
1.00	1.414	1.421	1.421	1.421	1.421	1.422
2.00	0.331	1.428	1.353	1.419	1.400	1.417
3.00	−0.130	1.422	1.236	1.397	1.351	1.410

通过上述综合分析可得:

(1)在弹性模量、钢丝直径、温度、跨度、垂度、高差这 6 个变量中,对可靠度指标影响最大是弹性模量,无论跨度、中跨垂度范围如何,弹性模量始终影响明显,且随着变异系数增大,可靠度指标减小,呈近似线性关系。

(2)随着温度变异系数增大,结构可靠度指标减小的趋势一直存在,只是在跨度较小时,这一趋势更为明显,而跨度增大时,这一趋势变得平缓。

(3)当跨度较小时,跨度 L 这一变量的影响较为明显,特别是角笼坝大桥边跨,跨度是对可靠度指标最主要的影响因素。当跨度增大时, L 的影响逐渐减小。

(4)钢丝直径、垂度、高差这 3 个变量对可靠度指标的影响一直不明显。

(5)当变量的变异系数增大时,可靠度指标反而可能会有小量的增大或者在一个值附近波动,这是由于蒙特卡洛法算法的本身特性,计算结果会有一定的变异性,但是影响很小,在可以接受的范围内。

3.4 空缆线形的可靠度

按照上述自适应重要抽样方法进行编程计算,可得到各桥空缆线形可靠度指标,下面仅给出部分具有代表性的计算,结果如表 6 所示。

表 6 西堠门大桥空缆线形的可靠度指标
Tab. 6 Reliability Indexes of Unloaded Cable Shape of Xihoumen Bridge

相对控制精度	中跨	北边跨	南边跨
$L/15\ 000$	3.079	2.146	1.752
$L/20\ 000$	2.265	1.481	1.161
$L/30\ 000$	1.313	0.745	0.509
$L/40\ 000$	0.802	0.357	0.152
$L/50\ 000$	0.480	0.069	−0.103

西堠门大桥两边跨比中跨索股数仅多 6 根(两边跨为 175 根,中跨为 169 根),但是空缆线形可靠度中跨比边跨大很多,说明各变量对中跨可靠度的影响较小,而对边跨较大。事实上,跨度、垂度、高差这 3 个变量的测量误差中边跨是小于中跨的,但是边跨的可靠度反而低,主要是各跨的垂跨比不同造成的。同基准索股一样,在其他影响因素相同的情况下,垂跨比越大可靠度指标越高。

表 7 为 4 座桥的中跨空缆线形可靠度指标。由表 7 可以看出,在相同的相对控制精度时,随着主缆索股根数的增加,可靠度指标减小,说明主缆索股根数越多,在架设过程中的累积误差就会越大,造成空缆的线形可靠度低。

表 7 4 座桥的中跨空缆线形可靠度指标
Tab. 7 Reliability Indexes of Middle Span Unloaded Cable Shape of Four Bridges

相对控制精度	角笼坝大桥	海沧大桥	坝陵河大桥	西堠门大桥
$L/15\ 000$	4.000	3.291	2.872	3.079
$L/20\ 000$	3.149	2.317	2.051	2.265
$L/30\ 000$	1.907	1.369	1.165	1.313
$L/40\ 000$	1.292	0.849	0.683	0.802
$L/50\ 000$	0.890	0.513	0.375	0.480

3.5 空缆线形的参数敏感性

使用与计算基准索股参数敏感性相同的方法,进行空缆线形参数敏感性分析计算。下面列出其具有代表性的结果,如表 8 所示。

从表 8 可以看出:温度测量误差是影响主缆空缆线形可靠度的主要因素,其变异系数倍数与可靠

表 8 西堠门大桥中跨 $L/30\,000$ 的参数敏感性
Tab. 8 Parametric Sensitivity of Middle Span
 $L/30\,000$ of Xihoumen Bridge

变异系数倍数	温度	垂度
0.50	2.93	1.30
0.75	1.88	1.28
1.00	1.28	1.27
2.00	0.23	1.20
3.00	-0.20	1.15

度指标几乎呈线性关系;在已有的测量精度下,垂度测量误差是次要因素,影响较小,但是也能看出随着误差增大可靠度指标减小的趋势。

4 结 语

(1)对于基准索股可靠度,高强钢丝弹性模量是主要的控制因素。因此对高强钢丝的生产过程应进行严格的质量控制,对弹性模量进行精确的试验测量,以此来保证基准索股的可靠度。

(2)其他影响因素,如钢丝直径、跨度、高差等,虽然对基准索股可靠度的影响不如弹性模量那么明显,但是也应尽量做到精确。

(3)在现有的测量及制作精度下,基准索股可靠度指标随着跨度的增大而减小,且中跨可靠度指标高于边跨。

(4)空缆线形的可靠度同样中跨高于边跨,且随主缆索股根数的增加可靠度指标减小。

(5)温度为影响空缆线形可靠度的主要因素,因此在架设主缆时,应尽量在温度均匀时进行,且做到对温度的精确测量。

参考文献:

References:

[1] 卢亚洲,颜东煌,许红胜,等. 自锚式悬索桥钢箱梁顶升施工的监控要点[J]. 长沙交通学院学报,2006,22(4):11-16.
LU Ya-zhou, YAN Dong-huang, XU Hong-sheng, et al. Supervision Points on Jacking up Steel-box Construction of Self-anchored Suspension Bridge[J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(4): 11-16.
[2] 潘 韬,杨德灿. 悬索桥主缆成桥线形的迭代算法[J]. 交通科技,2008(5):3-5.

PAN Tao, YANG De-can. Iteration Algorithm for Main Cable Shape of Suspension Bridge [J]. Transportation Science & Technology, 2008(5):3-5.
[3] CREMONA C. Probabilistic Approach for Cable Residual Strength Assessment[J]. Engineering Structures, 2003, 25(3):377-384.
[4] HAIGHT R Q, BILLINGTON D P, KHAZEM D. Cable Safety Factors for Four Suspension Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(4):157-167.
[5] 邵旭东,程翔云,李立峰. 桥梁设计与计算[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
SHAO Xu-dong, CHENG Xiang-yun, LI Li-feng. Bridge Design & Computation[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
[6] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究[J]. 土木工程学报,1996,29(2):3-9.
SHEN Rui-li. Calculation Methods for Design and Erection of Cable Curve of Suspension Bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2):3-9.
[7] 叶志龙. 悬索桥主缆架设误差影响分析及参数控制[D]. 成都:西南交通大学,2008.
YE Zhi-long. The Effect Analysis of Errors and Parameters Control for Main Cable Erection of Suspension Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
[8] 王 墩,阿肯江·托呼提. 工程结构设计可靠度理论综述[J]. 工业建筑,2008,38(增1):217-221.
WANG Dun, AKENJIANG Tuohuti. Summarization of Reliability Theory for Engineering Structural Design[J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1):217-221.
[9] RUBINSTEIN R Y. Simulation and the Monte Carlo Method[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
[10] SHINOZUKA M. Basic Analysis of Structural Safety [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(3): 721-740.
[11] ENGELUND S, RACKWITZ R. A Benchmark Study on Importance Sampling Techniques in Structural Reliability [J]. Structural Safety, 1993, 12(4):255-276.
[12] 郑云龙. 改进的重要抽样技巧[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(4):410-413.
ZHENG Yun-long. An Improved Importance Sampling Technique[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1998, 38(4):410-413.